

P-T CONDITIONS, U/Pb AND $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ISOTOPIC AGES OF UHT GRANULITES FROM CAPE KALTYGEI, WESTERN BAIKAL REGION

N.I. Volkova¹, E.I. Mikheev ^{1,2,✉}, A.V. Travin ^{1,2,3}, A.G. Vladimirov ^{1,3},
A.S. Mekhonoshin ^{4,5}, V.V. Khlestov¹

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 1 Pirogova St, Novosibirsk 630090, Russia

³ Tomsk State University, 36 Lenin Ave, Tomsk 634050, Russia

⁴ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

⁵ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

ABSTRACT. The study is focused on metapelitic granulites of Cape Kaltygei (Western Baikal region) that contain a diagnostic mineral assemblage of ultrahigh temperature (UHT) metamorphic rocks (orthopyroxene+sillimanite+quartz). The pseudosection-based thermobarometry yields peak metamorphic temperature and pressure values ($T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P\sim 9\text{ kbar}$) and suggests near-isobaric cooling (IBC) conditions during the retrograde evolution of the granulites. The U/Pb zircon age estimates for metamorphism ($\sim 1.87\text{ Ga}$) support the data published by other researchers. The SHRIMP-II U-Pb dating of zircon cores yields a minimum protolith age of 1.94–1.91 Ga. Biotites and amphiboles from granulites of Cape Kaltygei show the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic ages that are close to the Early Paleozoic accretion-collision system of the Western Baikal region.

KEYWORDS: Cape Kaltygei; Western Baikal region; UHT granulites; P-T pseudosections; U-Pb and Ar-Ar geochronology

FUNDING: The study was carried out under the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Evgeny I. Mikheev, mikheev@igm.nsc.ru

Received: May 19, 2020

Revised: June 30, 2020

Accepted: July 14, 2020

FOR CITATION: Volkova N.I., Mikheev E.I., Travin A.V., Vladimirov A.G., Mekhonoshin A.S., Khlestov V.V., 2021. P-T conditions, U/Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic ages of UHT granulites from Cape Kaltygei, Western Baikal region. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), 310–331. doi:10.5800/GT-2021-12-2-0526

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ, U/Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ИЗОТОПНОЕ ДАТИРОВАНИЕ УНТ ГРАНУЛИТОВ МЫСА КАЛТЫГЕЙ, ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ

Н.И. Волкова¹, Е.И. Михеев^{1,2}, А.В. Травин^{1,2,3}, А.Г. Владимиров^{1,3}, А.С. Мехоношин^{4,5}, В.В. Хлестов¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³ Томский государственный университет, 634050, Томск, пр-т Ленина, 36, Россия

⁴ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

⁵ Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

АННОТАЦИЯ. Метapelитовые гранулиты мыса Калтыгей в Западном Прибайкалье содержат критическую минеральную ассоциацию ультравысокотемпературных (УНТ) метаморфических пород (orthopyroxene+sillimanite+quartz). Оценки условий формирования пород методом псевдосечений позволили установить пиковые значения температур и давлений ($T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P\sim 9$ кбар) и показать, что ретроградная эволюция гранулитов характеризовалась субизобарическим остыванием (IBC). U/Pb оценки возраста метаморфизма (~ 1.87 млрд лет) подтверждают ранее полученные данные других исследователей. Оценка минимального U-Pb возраста (SHRIMP-II) протолита, полученная по ядрам цирконов, составила 1.94–1.91 млрд лет. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопные возрасты биотитов и амфиболов из гранулитов мыса Калтыгей близки к возрасту формирования раннепалеозойской аккреционно-коллизийной системы Западного Прибайкалья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мыс Калтыгей; Западное Прибайкалье; УНТ гранулиты; P-T псевдосечения; U-Pb и Ar-Ar изотопное датирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГМ СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании гранулитовых комплексов различных регионов мира ортопироксен-силлиманит-кварцевые породы всегда привлекают к себе особое внимание, так как они формируются в земной коре при ультравысокотемпературных (УНТ) условиях ($T>900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=7\text{--}13$ кбар). Индикаторами УНТ метаморфизма служат также сапфирин+кварц, осумилит, шпинель+кварц, мезопертитовый полевой шпат, алюмоортопироксен и высокие содержания Zr в рутиле [Harley, 1998, 2008; Kelsey, 2008; Kelsey, Hand, 2015].

Ортопироксен-силлиманит-кварцевые ассоциации были обнаружены в гранулитах мыса Калтыгей на западном берегу оз. Байкал [Volkova et al., 2015, 2017]. Первые оценки возраста этих гранулитов (1.88–1.89 млрд лет) были получены классическим U-Pb изотопным методом еще в конце прошлого века [Bibikova et al., 1987, 1990; Letnikov et al., 1995] и позднее подтверждены U-Pb (SHRIMP) датированием [Poller et al., 2005; Donskaya et al., 2017]. Однако в этих работах гранулиты Калтыгея не рассматривались как проявления УНТ метаморфизма, поскольку детальные исследования их минеральных парагенезисов и определение P-T условий метаморфизма не проводились. В этой работе мы приводим новые минералого-петрографические и изотопно-геохронологические данные для УНТ гранулитов Калтыгея, а также оценки пика и ретроградного P-T участка пути их метаморфизма на основании построения псевдосечений.

В течение длительного времени считалось, что гранулиты Калтыгея, впрочем, как и весь Ольхонский террейн, представляют собой выступы фундамента Сибирской платформы. Однако в работе Т.В. Донской с соавторами [Donskaya et al., 2017] гранулитовый комплекс Калтыгей рассматривается уже как экзотическая палеопротерозойская тектоническая пластина, включенная в Ольхонский коллизийный террейн, который был образован в результате ордовикской коллизии путем амальгамации фрагментов островных дуг, задуговых бассейнов, океанических островов и других тектонических элементов. Но в этом случае отпечаток ордовикской коллизии должен фиксироваться изотопно-геохронологическими исследованиями, а такие факты пока не отмечались. Для решения этой задачи в данной работе проведено не только U/Pb (SHRIMP) датирование цирконов из гранулитов Калтыгея, но и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопное датирование биотита и амфибола из этих пород.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрогенные элементы в отобранных пробах проанализированы рентгенофлуоресцентным методом по классической схеме, принятой в сертифицированных аналитических лабораториях, в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск). Составы минералов были определены на рентгеновском микроанализаторе Jeol JXA-8100 в Институте геологии и минералогии СО РАН. Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток поглощенных электронов – 40 нА, диаметр зонда 1–3 мкм,

время счета 10 с на каждой аналитической линии. Стандартами служили природные и синтетические минералы. Расчет Fe^{3+} производился на основе пяти кислородов и трех катионов для силлиманита, трех катионов и четырех кислородов для шпинели.

U/Pb датирование цирконов осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) по методике [Williams, 1997; Schuth et al., 2012]. Для выбора точек датирования использовались оптические (в проходящем и отраженном свете) и катодолюминесцентные изображения (КЛ), отражающие внутреннюю структуру цирконов. Всего было проанализировано 30 точек в 19 зернах цирконов из двух образцов. Интенсивность первичного пучка молекулярного кислорода составляла 4 нА, диаметр пятна (кратера) – 25 мкм при глубине 2 мкм. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием программы SQUID [Ludwig, 2000]. U-Pb отношения нормализовались на значение 0.0668, приписанное стандартному циркону TEMORA с возрастом 416.75 млн лет. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне 1σ, погрешности вычисленных значений конкордантных возрастов и пересечений с конкордией приводятся на уровне 2σ. Построение графиков с конкордией

проводилось с использованием программы ISOPLOT/EX [Ludwig, 1999].

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследования проводились методом ступенчатого прогрева проб по методике [Travin et al., 2009; Travin, 2016]. Выделенные минеральные фракции крупностью не менее 0.15 мм совместно с навесками стандартных образцов биотита МСА-11 и LP-6 в качестве мониторов были упакованы в алюминиевую фольгу и после предварительной откачки воздуха запаивались в кварцевых ампулах. Облучение производилось в кадмированном канале исследовательского реактора ВВР-К типа Научно-исследовательского института ядерной физики при Томском политехническом университете. При облучении в охлаждаемом водой канале реактора температура ампул с образцами не поднимается выше 100 °С. Градиент нейтронного потока не превышал 0.5 % в размере образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевом реакторе с печью внешнего нагрева. Холостой опыт по ^{40}Ar (10 мин при 1200 °С) не превышал 5×10^{-10} нсм³. Двукратная очистка выделенного аргона производилась с помощью Ti- и ZrAl SAES-геттеров. Изотопный состав аргона измерялся на многоколлекторном масс-спектрометре Argus фирмы "GV-Instruments" в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) по стандартным

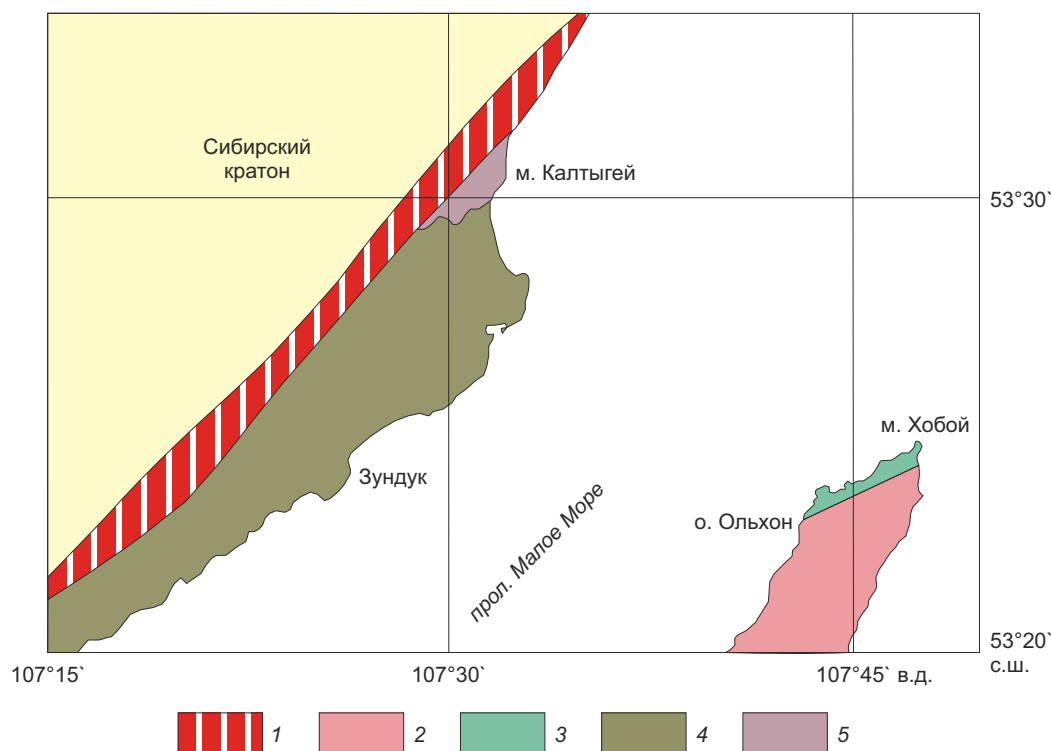


Рис. 1. Расположение гранулитов мыса Калтыгей в Западном Прибайкалье.

1 – раннепалеозойские бластомилониты коллизионного шва; 2–5 – Ольхонский террейн: 2 – раннепалеозойские метаморфические породы амфиболитовой фации зоны Анга-Сахюрты, 3 – гранулиты Чернорудской зоны, 4 – неопротерозойские гнейсы и гранито-гнейсы зоны Зундук, 5 – палеопротерозойские гранулиты мыса Калтыгей.

Fig. 1. Schematic geological map of the northern part of the Western Baikal region.

1 – Early Paleozoic blastomylonites of the collision suture; 2–5 – Olkhon terrane: 2 – Early Paleozoic metamorphic rocks of the Anga-Sakhyurta zone (amphibolite facies), 3 – granulites of the Chernorud zone, 4 – Neoproterozoic gneisses and granite-gneisses of the Zunduk zone, 5 – Paleoproterozoic granulites of Cape Kaltygei.

методикам. Аналитические ошибки измерений соответствуют интервалу $\pm 1\sigma$.

3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Гранулиты мыса Калтыгей слагают изолированный тектонический блок (рис. 1) на западном берегу оз. Байкал (между пос. Онгурён и р. Зундук), ограниченный с северо-запада бластомилонитами коллизийного шва, отделяющего метаморфические породы Ольхонского террейна от палеопротерозойских образований сарминской серии Сибирской платформы, которые в виде узкой полосы протягиваются вдоль северо-западного побережья Байкала. К югу от гранулитов Калтыгея обнажаются неопротерозойские (807 \pm 9 млн лет) гнейсы и гранитогнейсы зоны Зундук [Donskaya et al., 2017], а еще южнее располагаются раннекаледонские гранулиты Чернорудской зоны, имеющие U/Pb возраст 500–490 млн лет [Bibikova et al., 1990; Letnikov et al., 1995; Vladimirov et al., 2011].

4. ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПОРОД

По химическому составу гранулиты Калтыгея можно разделить на две группы: А и Б (Прил. 1, табл. 1). В группу А входят гранулиты с высокими содержаниями кремнезема и более низкими глинозема и железа

(>68 мас. % SiO_2 , 9.6–14.4 мас. % Al_2O_3 , 2–11 мас. % $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$) по сравнению с гранулитами группы Б (50–59 мас. % SiO_2 , 16.6–20.6 мас. % Al_2O_3 , 12–17 мас. % $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$). Ортопироксен-силлиманит-кварцевые ассоциации, являющиеся признаком УНТ метаморфизма, были обнаружены в той части гранулитов группы А, которая характеризуется самой высокой магнезиальностью (А–2: $\text{Mg}\# = 0.48\text{--}0.57$).

Гранулиты представлены разнообразными кордиерит-биотит-силлиманитовыми, гранат-гиперстен-силлиманит-кордиеритовыми, гиперстен-кордиерит-силлиманитовыми, гранат-кордиерит-биотит-силлиманитовыми гнейсами (Прил. 1, табл. 2). При этом в гранулитах группы А были установлены Оpx-Sil-Qz (рис. 2, а) парагенезисы ($\text{Grt} + \text{Opx} + \text{Crd} + \text{Fsp} + \text{Sil} + \text{Qz}$; $\text{Opx} + \text{Crd} + \text{Pl} + \text{Sil} + \text{Qz}$), которые свидетельствуют об ультравысокотемпературном метаморфизме гранулитов Калтыгея [Volkova et al., 2015, 2017]. Другими признаками УНТ метаморфизма этих пород являются присутствие мезопертитового К-Na полевого шпата (рис. 2, б) и высокие содержания Al_2O_3 в ортопироксене (до 7–8 мас. %). Гранулиты группы Б обычно не содержат Оpx-Sil-Qz парагенезисы и представлены следующими ассоциациями: $\text{Grt} + \text{Crd} + \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{Qz} (+\text{Spl})$, $\text{Crd} + \text{Kfs} + \text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qz}$. Следует отметить, что зеленая шпинель встречается

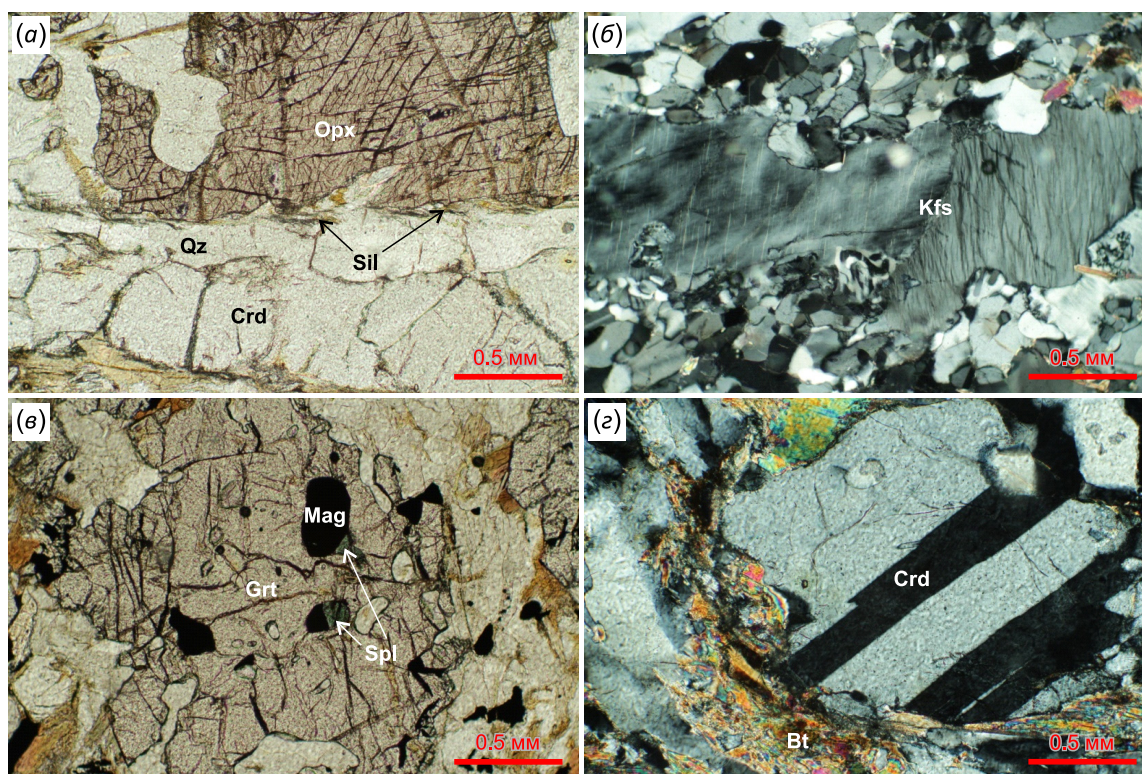


Рис. 2. Фотографии шлифов УНТ гранулитов мыса Калтыгей, Западное Прибайкалье.

(а) – критическая Оpx-Sil-Qz ассоциация: структурные взаимоотношения Оpx и Sil свидетельствуют об их одновременной кристаллизации; (б) – мезопертитовый полевой шпат; (в) – герцинит-магнетитовые включения в порфиробласте граната; (г) – полисинтетические двойники кордиерита.

Fig. 2. Plane (а, в) and cross-polarized (б, г) photomicrographs of UHT granulites from Cape Kaltygei.

(а) – Оpx+Sil+Qz association: structural relationships between Оpx and Sil give evidence of their simultaneous crystallization; (б) – mesoperthitic feldspar; (в) – hercynite-magnetite inclusions in garnet porphyroblast; (г) – polysynthetic twinning in cordierite.

только в виде включений в гранате (рис. 2, в). Практически во всех образцах гранулитов встречаются крупные кристаллы циркона. Другие акцессорные минералы представлены гематитом, ильменитом, турмалином, апатитом, монацитом. Породы массивные или неясно-полосчатые, среднекрупнозернистые, имеют светло-серую и серую окраску и порфиروبластовую, гранобластовую структуру. Иногда гранулиты мигматизированы и показывают четкое разделение на участки лейкосомы и меланосомы.

5. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Во всех типах гранулитов Калтыгея гранаты представлены пироп-альмандиновыми твердыми растворами, содержащими небольшие количества спессартинового и гроссулярового компонентов [Volkova et al., 2017] (Прил. 1, табл. 3). При этом гранаты из гранулитов группы А ($\text{Alm}_{58-65}\text{Prp}_{33-38}\text{Grs}_{1-3}\text{Sps}_{0-1}$) более магнезиальные ($X_{\text{Mg}}=0.33-0.41$) по сравнению с гранатами из гранулитов группы Б ($\text{Alm}_{65-71}\text{Prp}_{25-30}\text{Grs}_{2-3}\text{Sps}_{1-2}$; $X_{\text{Mg}}=0.25-0.32$). Зональность в гранатах практически отсутствует. Содержание Al_2O_3 в ортопироксене гранулитов группы А варьируется от 8.0 до 4.5 мас. %, при этом максимальные значения отмечаются в ортопироксенах из безгранатовых ассоциаций, и уменьшается от центра к краю зерен минерала (Прил. 1, табл. 4). Следует отметить, что ортопироксены из безгранатовых ассоциаций содержат и гораздо больше MnO (1.7–2.2 мас. % против 0.01–0.12 мас. %). Магнезиальность ортопироксенов составляет $X_{\text{Mg}}=0.57-0.66$, но в пределах шлифа варьируется в пределах 1–2 %. Ортопироксен в единственном образце пироксенсодержащего гранулита группы Б характеризуется низкими содержаниями Al_2O_3 (1.6–2.8 мас. %), но близкой магнезиальностью ($X_{\text{Mg}}=0.64-0.66$). Кордиерит (рис. 2, г; Прил. 1, табл. 5), как и силлиманит, встречается во всех образцах и является самой магнезиальной фазой ($X_{\text{Mg}}=0.79-0.89$). Не отмечается существенных различий составов минерала между различными типами пород. Общая сумма оксидов в анализах минерала составляет от 98.5 до 99.8 мас. %, что свидетельствует о небольших варьирующихся содержаниях CO_2 в структуре кордиерита. Биотиты из разных групп гранулитов резко различаются по составу (Прил. 1, табл. 6). Гранулиты группы А содержат агрегаты мелкочешуйчатого высокомагнезиального низкотитанистого биотита ($\text{TiO}_2=2.3-3.6$ мас. %, $X_{\text{Mg}}=0.74-0.86$), замещающего кордиерит в условиях амфиболитовой фации. В то же время более железистые ($X_{\text{Mg}}=0.62-0.66$) биотиты группы Б характеризуются высокими содержаниями $\text{TiO}_2=4.0-4.9$ мас. %. В целом биотиты демонстрируют отрицательную корреляцию между магнезиальным номером и содержанием титана. В гранулитах группы А встречается главным образом мезопертитовый полевой шпат (рис. 2, б; Прил. 1, табл. 7), демонстрирующий структуры распада, где ламели ($\text{Na}+\text{Ca}$) полевого шпата ($\text{An}_{1-18}\text{Ab}_{72-89}\text{Or}_{1-26}$) находятся в калиевом полевым шпате ($\text{An}_{0-1}\text{Ab}_{8-24}\text{Or}_{75-92}$). В гранулитах группы Б наряду с K-Na полевым шпатом

($\text{An}_{0-1}\text{Ab}_{8-13}\text{Or}_{86-92}$) встречается и плагиоклаз: олигоклаз (An_{25-30}) в ассоциации с гранатом ($\text{Grt}+\text{Crd}+\text{Bt}+\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Sil}+\text{Qz}+\text{Spl}$) и андезин (An_{40-47}) – в безгранатовой ассоциации ($\text{Opx}+\text{Crd}+\text{Bt}+\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Sil}+\text{Qz}$). Зеленая шпинель встречается только внутри кристаллов граната в гранулитах типа Б и представляет собой твердый раствор герцинит (50–65 %) – шпинель (22–38 %) – ганит (9–16 %) с низкими содержаниями Cr_2O_3 (0.15–1.20 вес. %) (Прил. 1, табл. 8). Содержание ZnO в шпинели составляет 4.7–8.0 вес. %, $X_{\text{Mg}}=0.26-0.43$. Следует отметить, что зерна шпинели практически не зональные, но существенно отличаются друг от друга по составу даже в пределах одного шлифа и одного и того же минерала-хозяина [Volkova et al., 2017].

6. P-T УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА И ПСЕВДОСЕЧЕНИЯ

Оценки P-T условий метаморфизма, полученные с использованием Grt–Opx термометра [Aranovich, Berman, 1997], Ti-in-Grt и Ti-in-Opx термометров [Kawasaki, Motoyoshi, 2007], Grt–Crд–Sil–Qz барометра [Wells, 1979], программ winTWQ v. 2.64 [Berman, 2007; Berman et al., 2007], THERMOCALC [Holland, Powell, 1998], свидетельствуют о высоких температурах образования этих гранулитов (830–940 °C) и умеренных давлениях (7.5–8.5) кбар (Прил. 1, табл. 9).

Главные проблемы в определении пика P-T условий для пород гранулитовой фации связаны с тем, что высокие скорости внутризерновой и межзерновой диффузии для большинства катионов приводят к установлению новых равновесий на начальных стадиях остывания. Следствием этого является то, что геотермометры и геобарометры, используемые для гранулитов, обычно дают заниженные оценки P-T условий, которые достигаются на регрессивном этапе метаморфизма [Volkova et al., 2016], а гомогенизация минеральных зерен уничтожает зональность.

Таким образом, информация о пике метаморфизма практически не сохраняется в составе Fe-Mg минералов, пока между ними осуществляются обменные реакции. Более мощным альтернативным подходом к определению экстремальных условий пика УНТ метаморфизма является метод псевдосечений, основанный на минимизации энергии Гиббса, который представляет собой графическое средство, позволяющее на основе химического состава породы получить информацию о минеральных ассоциациях при определенных P-T условиях.

P-T псевдосечения для УНТ гранулитов мыса Калтыгея [Volkova et al., 2017] рассчитывались в системе $\text{MnO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (MnNCKFMASH) в интервале давлений 6–10 кбар и температур 750–1050 °C с применением программного комплекса PERPLE_X [Connolly, 2005] и моделей активности из взаимосогласованной термодинамической базы данных [Holland, Powell, 1998]. Для построения диаграммы использовался химический состав породы (Прил. 1, табл. 1), включая содержание H_2O .

Рассчитанные псевдосечения для обр. 14–47 (рис. 3) показывают, что гранат устойчив при $P > 6$ –8 кбар, биотит исчезает полностью при температуре > 800 °C, а ортопироксен+силлиманит+кварц стабильны только при $T > 800$ °C и $P > 8.5$ кбар. Отсутствие на диаграмме калишпата и плагиоклаза можно объяснить частичным плавлением этих лейкократовых минералов. Нанесение на псевдосечение минеральных изоплет позволило оценить P-T условия пика метаморфизма и реконструировать ретроградный участок P-T трендов для гранулитов. В качестве изоплет использовалось

содержание Al в ортопироксене, уменьшающееся от 0.29 до 0.19 ф.е., и X_{Ca} в гранате, варьирующееся от 0.009 до 0.013. Оценки пика P-T условий метаморфизма гранулитов Калтыгея оцениваются в 950 °C и 9.2 кбар, а ретроградный участок пути можно определить как суб-изобарическое остывание (IBC).

7. ИЗОТОПНОЕ ДАТИРОВАНИЕ (U-PB, AR-AR)

Для изотопно-геохронологических исследований было отобрано три образца: (1) обр. 14-48 – гранулит группы А, который содержит критический парагенезис

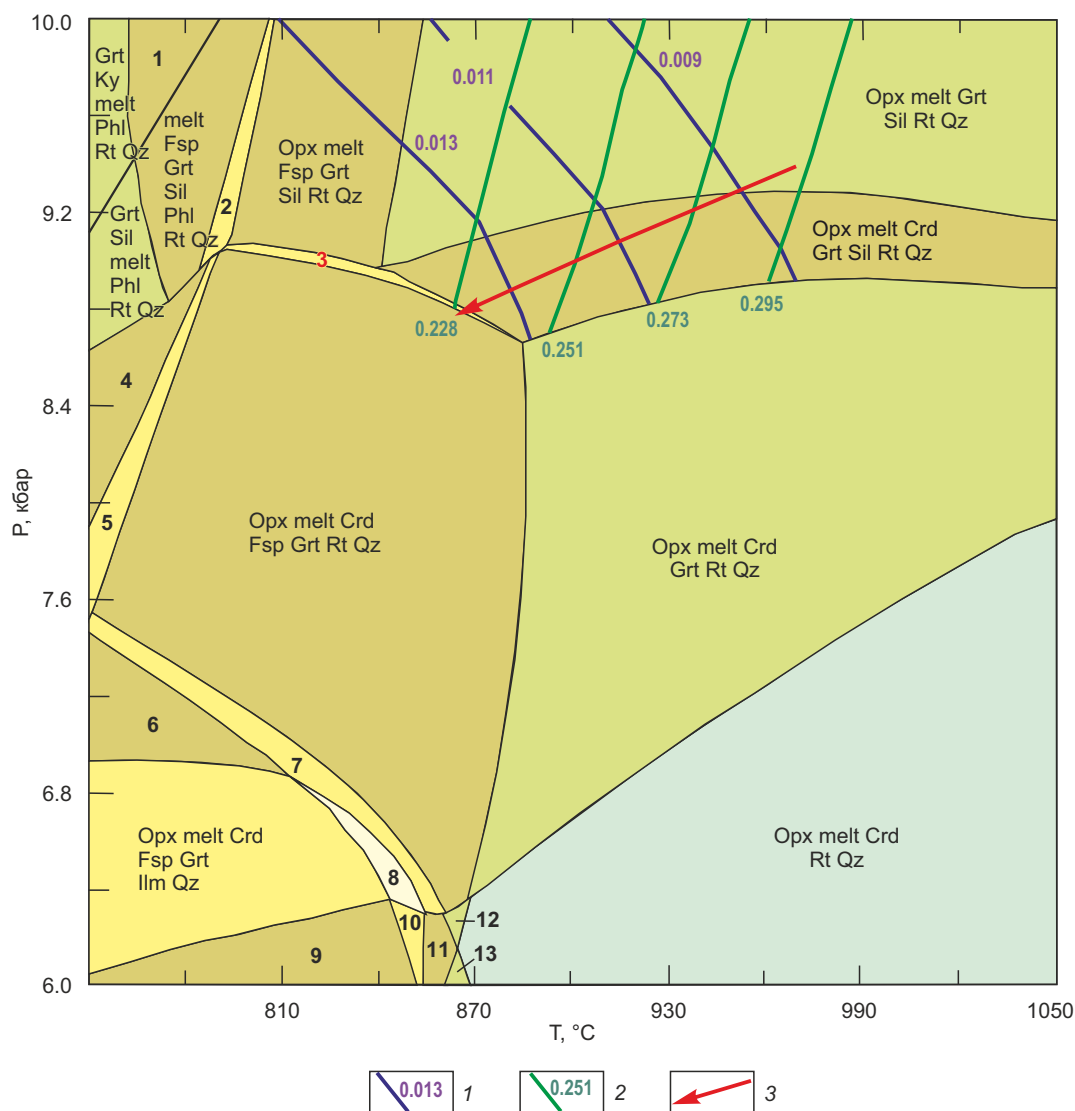


Рис. 3. P-T псевдосечение, рассчитанное для гранулитов с мыса Калтыгей (обр. № 14-47).

1 – $X_{\text{Ca}} = \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})$ в гранате; 2 – изоплеты содержания Al в ортопироксене; 3 – тренд изменения P-T условий. Минеральные ассоциации пронумерованных полей: 1 – melt Fsp Grt Ky Phl Rt Qz, 2 – Opx melt Fsp Grt Sil Phl Rt Qz, 3 – Opx melt Crd Fsp Grt Sil Rt Qz, 4 – melt Crd Fsp Grt Sil Phl Rt Qz, 5 – Opx melt Crd Fsp Grt Phl Rt Qz, 6 – Opx melt Crd Fsp Grt Ilm Qz, 7 – Opx melt Crd Fsp Grt Rt Ilm Qz, 8 – Opx melt Crd Fsp Grt Rt Ilm Qz, 9 – Opx melt Crd Fsp Ilm Qz, 10 – Opx melt Crd Fsp Rt Ilm Qz, 11 – Opx melt Crd Fsp Rt Ilm Qz, 12 – Opx melt Crd Fsp Rt Qz, 13 – Opx melt Crd Rt Ilm Qz.

Fig. 3. P-T pseudosection for granulites of Cape Kaltygei (sample 14-47).

1 – $X_{\text{Ca}} = \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})$ in garnet; 2 – isopleths of Al content in orthopyroxene; 3 – P-T trend. Fields are numbered: 1 – melt Fsp Grt Ky Phl Rt Qz, 2 – Opx melt Fsp Grt Sil Phl Rt Qz, 3 – Opx melt Crd Fsp Grt Sil Rt Qz, 4 – melt Crd Fsp Grt Sil Phl Rt Qz, 5 – Opx melt Crd Fsp Grt Phl Rt Qz, 6 – Opx melt Crd Fsp Grt Ilm Qz, 7 – Opx melt Crd Fsp Grt Rt Ilm Qz, 8 – Opx melt Crd Fsp Grt Rt Ilm Qz, 9 – Opx melt Crd Fsp Ilm Qz, 10 – Opx melt Crd Fsp Rt Ilm Qz, 11 – Opx melt Crd Fsp Rt Ilm Qz, 12 – Opx melt Crd Fsp Rt Qz, 13 – Opx melt Crd Rt Ilm Qz.

Орх-Sil-Qtz; (2) обр. 14-55 – гранулит группы Б, не содержащий ортопироксен; (3) обр. 14-43 (Amp+Bi+Crd+Pl+Kfs+Qz+Sil), представляющий собой наиболее измененный гранулит. Во всех образцах гранулитов встречаются крупные кристаллы циркона.

В обр. 14-48 можно выделить два типа цирконов (рис. 4, а) [Volkova et al., 2017]. К первому типу относятся округлые или неправильной формы зерна циркона, имеющие светлую оболочку вокруг темного резорбированного ядра с осцилляторной зональностью или без нее. Эти светлые каемки интерпретируются как метаморфические нарастания. Цирконы второго типа – эвгедральные призматические (коэффициент удлинения 2.0 и выше) зерна с концентрической (осцилляторной) зональностью в центральных участках, согласующейся с их образованием в результате частичного плавления метаосадков. Округлые зерна цирконов содержат единичные ядра циркона с возрастом 2.05, 1.97, 1.98 млрд лет и доминирующие – ~1.94–1.91 млрд лет (Прил. 1, табл. 10; рис. 5). Возраст 1.94–1.91 млрд лет принят в качестве минимальной оценки времени образования протолитов этих пород.

«Древние» ядра циркона (2.05–1.97 млрд лет) скорее являются ксеногенными. В то же время эвгедральные цирконы, образовавшиеся, вероятно, при плавлении осадков в условиях УНТ метаморфизма, и краевая часть одного округлого зерна дают средний конкордантный возраст 1866 ± 4 млн лет. Этот возраст может рассматриваться как время УНТ метаморфизма [Volkova et al., 2017].

В обр. 14-55 цирконы представлены главным образом округлыми или изометричными мелкими многогранниками кристаллами с алмазным блеском и высокой прозрачностью. Они бесцветны или слабо окрашены в желтовато-розовые тона. Реже встречаются короткопризматические кристаллы с коэффициентом удлинения 1.5. В катодолюминесцентном изображении в центральных участках округлых и короткопризматических кристаллов иногда наблюдаются темные ядра с зональностью или без нее (см. рис. 4, б). Кроме того, в обр. 14-55 было проанализировано одно зерно циркона неправильной «оскольчатой» формы, которое, по-видимому, является ксеногенным и имеет возраст ядра 2.42 млрд лет. Ядро еще одного циркона показало

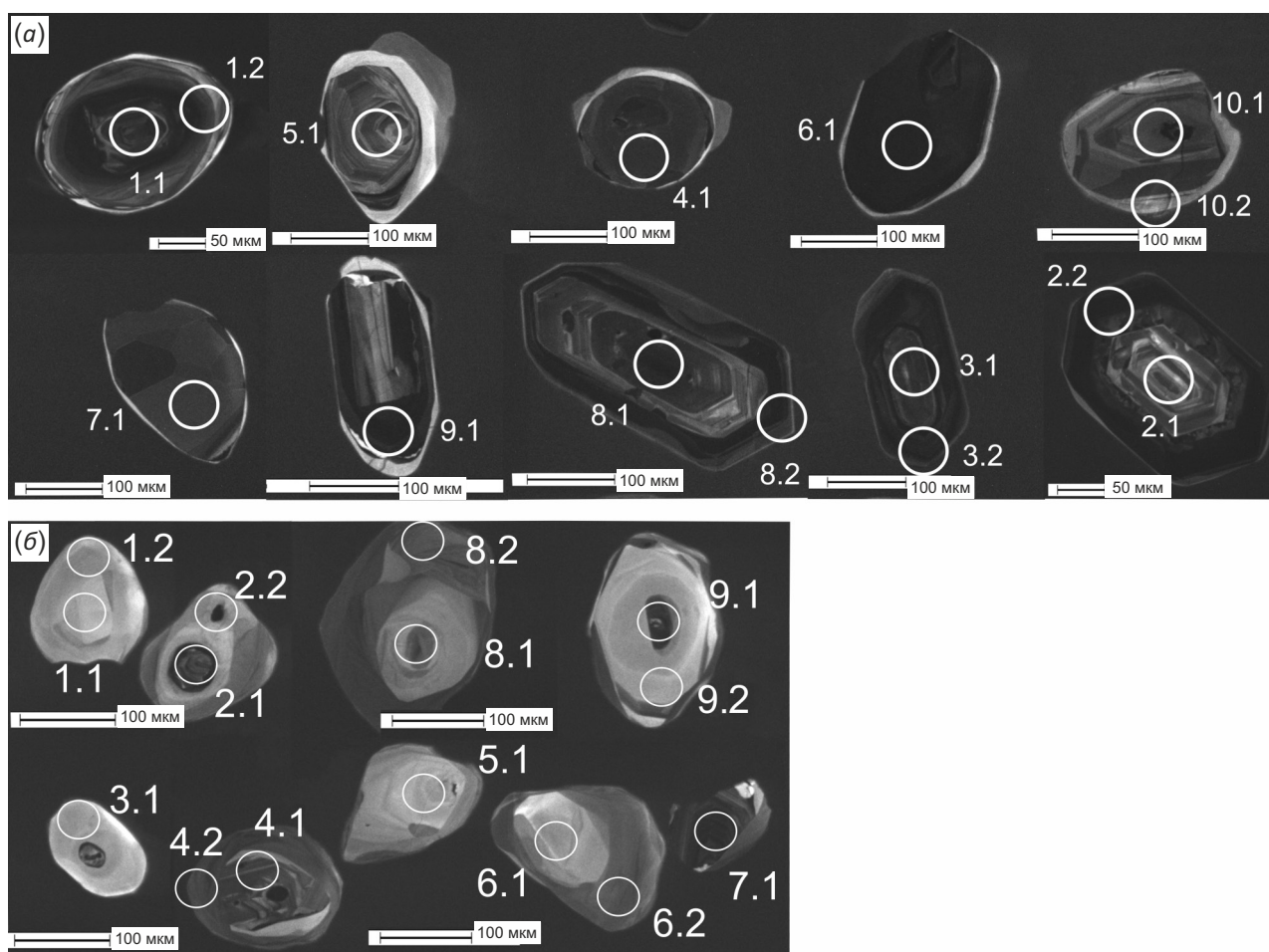


Рис. 4. Катодолюминесцентные изображения цирконов из гранулитов мыса Калтыгей: (а) – обр. 14-48; (б) – обр. 14-55. Номера точек опробования соответствуют таковым в Прил. 1, табл. 10.

Fig. 4. Representative CL images of zircons from granulites of Cape Kaltyge: (a) – sample 14-48; (b) – sample 14-55. The numbers of sampling points correspond to those in Ap. 1, Table 10.

возраст 1.94 млрд лет, совпадающий с предполагаемым возрастом протолита в обр. 14-48. Большинство возрастов, полученных для обр. 14-55, конкордантны и показывают средневзвешенное значение 1868 ± 6 млн лет с 95%-ной доверительной вероятностью (рис. 5, 13 точек).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопное датирование гранулитов Калтыгея было проведено по биотиту из обр. 14-55 и роговой

обманке из обр. 14-43 (рис. 6). В возрастном спектре биотита выделяются два промежуточных плато, разделенных ступенью с повышенным значением. Плато характеризуются значениями возраста 544.0 ± 5.0 и 473.3 ± 4.4 млн лет и долей выделенного ^{39}Ar , равной 42 и 38 % соответственно. Интересно отметить, что биотит в этой породе железистый ($X_{\text{Mg}} = 0.62-0.66$) и с высоким содержанием $\text{TiO}_2 = 4.1-5.1$ вес. %, что позволяет

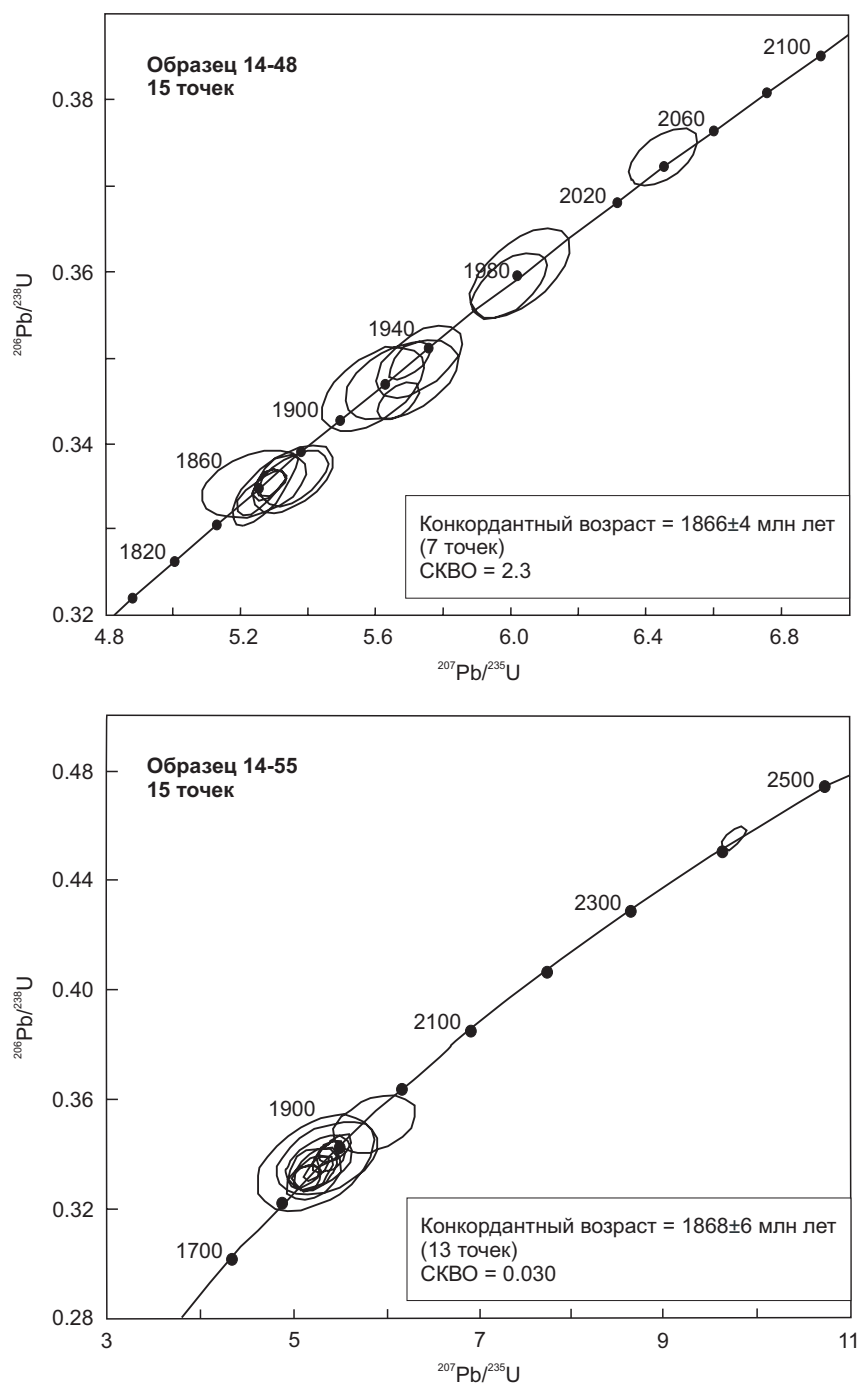


Рис. 5. Диаграммы с конкордией для цирконов из гранат-ортопироксен-биотит-кордиеритового (обр. 14-48: $\text{Grt}_{62-63} + \text{Opx}_{41-43} + \text{Crd}_{19-22} + \text{Bi}_{14-21} + \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{Qtz}$) и гранат-кордиерит-биотитового (обр. 14-55: $\text{Grt}_{68-71} + \text{Crd}_{19-22} + \text{Bi}_{35-38} + \text{Pl}_{26-29} + \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{Qtz} + \text{Sp}$) гранулитов Калтыгея.

Fig. 5. Concordia diagrams for zircons from granulites of Cape Kaltygei: garnet-orthopyroxene-biotite-cordierite (sample 14-48: $\text{Grt}_{62-63} + \text{Opx}_{41-43} + \text{Crd}_{19-22} + \text{Bi}_{14-21} + \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{Qtz}$); garnet-cordierite-biotite (sample 14-55: $\text{Grt}_{68-71} + \text{Crd}_{19-22} + \text{Bi}_{35-38} + \text{Pl}_{26-29} + \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{Qtz} + \text{Sp}$).

считать его минералом первичного гранулитового парагенезиса. В спектре сине-зеленой роговой обманки из обр. 14-43 также выделяются два плато с возрастом 539.4 ± 5.0 и 482.0 ± 4.6 млн лет, характеризующиеся соответственно 53 и 45 % выделенного ^{39}Ar .

Можно предположить, что в спектрах обеих минеральных фракций проявились компоненты, соответствующие несколько различающимся составом, размером минеральным фазам, что приводит к различию в температуре закрытия изотопной системы и соответственно к различию в фиксируемых системой значений возраста. Отмечается согласование в пределах ошибки датировок, полученных по биотиту и роговой обманке, что повышает степень их достоверности.

8. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования гранулитов мыса Калтыгей в Западном Прибайкалье показали, что они формировались в условиях УНТ метаморфизма, о чем свидетельствуют индикаторные $\text{Orx}+\text{Sil}+\text{Qtz}$ ассоциации, высокие содержания Al в ортопироксене и мезопертитовый полевой шпат, а также оценки P-T параметров образования этих пород.

U/Pb изотопные исследования цирконов из гранулитов Калтыгея показали наличие как минимум двух возрастных групп: 1) осцилляторных ядер ($1.94\text{--}1.91$ млрд лет) округлых зерен циркона и 2) удлинённо-призматических кристаллов с осцилляторной зональностью и темных каемок округлых кристаллов (1.87 млрд лет).

Широкий интервал значений U/Pb возрастов для ядер округлых цирконов подтверждает их детритовое происхождение и свидетельствует об осадочном протолите этих пород, а возраст 1.87 млрд лет рассматривается как возраст УНТ метаморфизма.

Следует отметить, что наши оценки возраста метаморфизма (1868 ± 6 , 1866 ± 4 млн лет) гранулитов Калтыгея совпадают с изотопно-геохронологическими данными, полученными ранее классическим U/Pb методом: $1.88\text{--}1.89$ млрд лет [Bibikova et al., 1990; Letnikov et al., 1995], а также более поздними U-Pb (SHRIMP) датами – 1876 ± 6 млн лет [Poller et al., 2005], 1873 ± 6 (ядра) – 1829 ± 22 млн лет (края) [Donskaya et al., 2017].

В отличие от предыдущих исследований, нами был также получен возраст $1.94\text{--}1.91$ млрд лет по ядрам округлых зерен цирконов, который можно рассматривать как возраст протолита гранулитов мыса Калтыгея. Следует отметить, что аналогичный возраст ($1.94\text{--}1.92$ млрд лет) был определен для времени образования протолитов мафических гранулитов Ангаро-Канского блока Енисейского кряжа [Turkina, Sukhorukov, 2015]. В этой же работе для двупироксеновых гранулитов определен также возраст высокотемпературного метаморфизма (~ 1.85 млрд лет), совпадающий с образованием коллизионных гранитоидов (1.84 млрд лет) данного региона, а также со временем гранулитового метаморфизма пород Калтыгея. В то же время в гранат-двупироксеновых гранулитах Ангаро-Канского блока фиксируется и второй этап УНТ метаморфизма (~ 1.77 млрд лет).

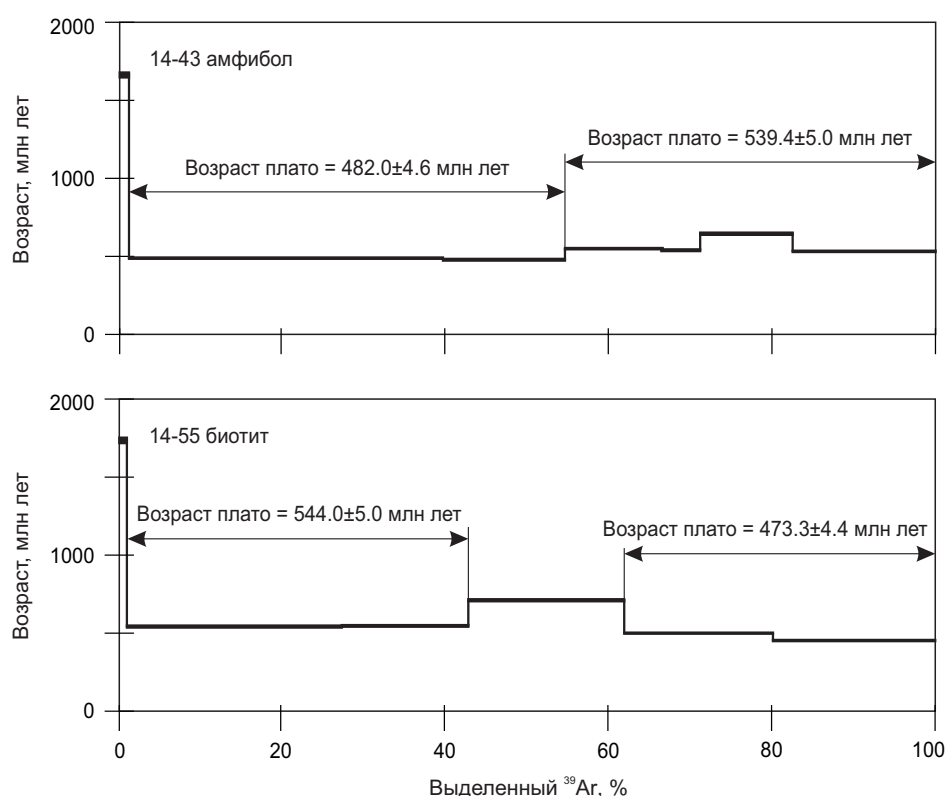


Рис. 6. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования биотита и амфибола из гранулитов мыса Калтыгей.

Fig. 6. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of biotites and amphiboles from granulites of Cape Kaltygei.

[Turkina, Sukhorukov, 2015], который отсутствует в термохронологии гранулитов Калтыгея.

Близкий U/Pb возраст формирования – 1.89–1.84 млрд лет – имеют многие базит-ультрабазитовые комплексы, граниты А- и I-типа, встречающиеся вдоль южной окраины Сибирского кратона [Donskaya et al., 2005; Gladkochub et al., 2012, 2016; Mekhonoshin et al., 2016]. Однако в настоящее время нет оснований соотнести Калтыгей с тем или иным докембрийским блоком или кратоном, поскольку древние породы с возрастом 1.87–1.85 млрд лет широко распространены во многих блоках ЦАСП и докембрийских кратонах [Donskaya et al., 2017].

Что же касается $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастов, то полученные даты совпадают с оценками возраста термальных событий, имевших место в Ольхонском террейне, южнее мыса Калтыгей. Так, U-Pb возраст 530 ± 5 млн лет был получен по магматическим цирконам из мигматитов Чернорудской зоны [Vladimirov et al., 2011]. Детритовые цирконы мафических гранулитов Тонты имеют возраст ~ 545 млн лет, а в зоне Анга-Сахюрты отмечены гнейсы кислого состава, содержащие детритовые цирконы с возрастом 535 и 531 млн лет [Donskaya et al., 2017]. Эти даты близки к полученным нами Ar-Ar возрастам 544.0 ± 5.0 и 539.4 ± 5.0 млн лет для пород Калтыгея и отвечают, по-видимому, доколлизийному этапу развития региона, предшествующему гранулитовому метаморфизму Чернорудской зоны (~ 500 лет). Ar-Ar изотопные возрасты 473.3 ± 4.4 и 482.0 ± 4.6 млн лет полностью отвечают основному аккреционно-коллизийному событию в Ольхонском регионе, включая массовое гранитообразование [Volkova et al., 2008, 2010; Travin et al., 2009; Vladimirov et al., 2011; Donskaya et al., 2017]. Это позволяет утверждать, что уже с начала кембрия (раннекаледонское время) этот экзотический блок входил в состав Ольхонского коллизийного террейна и характеризовался общей историей тектонотермальных событий, что подтверждает точку зрения Т.В. Донской с соавторами [Donskaya et al., 2017] о тектонической позиции гранулитов Калтыгея.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Палеопротерозойские гранулиты мыса Калтыгей на западном берегу оз. Байкал содержат диагностическую для УНТ метаморфизма ассоциацию высокоглиноземистого ортопироксена (Al_2O_3 до 7–8 вес. %), силлиманита и кварца. Моделирование фазовых равновесий с использованием псевдосечений и минеральных изоплет указывает на субизобарический P-T путь остывания при эксгумации гранулитов. Оценки пиковых значений P-T условий метаморфизма – 950°C и ~ 9 кбар, свидетельствующие об УНТ метаморфизме, были получены на основе анализа псевдосечений, построенных в системе MnNCKFMASH.

U/Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопное датирование гранулитов Калтыгея свидетельствует о сложной многоэтапной истории их формирования. Протолит гранулитов Калтыгея сформировался не ранее 1.94–1.91 млрд лет назад. Средневзвешенный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст, полученный

по цирконам U/Pb изотопным методом (SHRIMP), составляет 1868 ± 6 млн лет и 1866 ± 4 млн лет и интерпретируется как время пика УНТ метаморфизма и образования метapelитовых гранулитов.

Гранулиты мыса Калтыгей подверглись наложенному ретроградному метаморфизму в кембро-ордовикское время. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопные даты по биотитам и амфиболом из гранулитов близки к возрастам метаморфических и магматических пород Ольхонского террейна, что позволяет предполагать их совместное участие в раннепалеозойских коллизийных событиях, имевших место в Западном Прибайкалье.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aranovich L.Y., Berman R.G., 1997. A New Garnet-Orthopyroxene Thermometer Based on Reversed Al_2O_3 Solubility in $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Orthopyroxene. *American Mineralogist* 82 (3–4), 345–353. <https://doi.org/10.2138/am-1997-3-413>.

Berman R.G., 2007. WinTWQ: A Software Package for Performing Internally-Consistent Thermobarometric Calculations. Version 2.3. Geological Survey of Canada, Open File 5462, 41 p. <https://doi.org/10.4095/223228>.

Berman R.G., Aranovich L.Y., Rancourt P., Mercier P.H., 2007. Reversed Phase Equilibrium Constraints on the Stability of Mg-Fe-Al Biotite. *American Mineralogist* 92, 139–150. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2051>.

Bibikova E.V., Karpenko S.F., Sumin L.V., Bogdanovsky O.G., Kirnozova T.I., Lyalikov A.V., Makarov V.A., Arakelyants M.M., Korikovskiy S.P., Fedorovskiy V.S., 1990. U-Pb, Sm-Nd and K-Ar Ages of Metamorphic and Igneous Rocks of the Olkhon Region (Western Baikal Region). In: *Geology and Geochronology of the Precambrian of the Siberian Platform and Its Framing*. Nauka, Leningrad, p. 170–183 (in Russian) [Бибикова Е.В., Карпенко С.Ф., Сумин Л.В., Богдановский О.Г., Кирнозова Т.И., Ляликов А.В., Макаров В.А., Аракелянц М.М., Кориковский С.П., Федоровский В.С. U-Pb, Sm-Nd и K-Ar возраст метаморфических и магматических пород Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Геология и геохронология докембрия Сибирской платформы и ее обрамления. Л.: Наука, 1990. С. 170–183].

Bibikova E.V., Korikovskiy S.P., Kirnozova T.I., Sumin L.V., Arakelyants M.M., Fedorovskiy V.S., Petrova Z.I., 1987. Age Determination of Rocks from the Baikal-Vitim Greenstone Belt by Isotope-Geochronological Methods. In: *Isotope Dating of the Processes of Metamorphism and Metasomatism*. Nauka, Moscow, p. 154–164 (in Russian) [Бибикова Е.В., Кориковский С.П., Кирнозова Т.И., Сумин Л.В., Аракелянц М.М., Федоровский В.С., Петрова З.И. Определения возраста пород Байкало-Витимского зеленокаменного пояса изотопно-геохронологическими методами // Изотопное датирование процессов метаморфизма и метасоматоза. М.: Наука, 1987. С. 154–164].

Connolly J.A.D., 2005. Computation of Phase Equilibria by Linear Programming: A Tool for Geodynamic Modeling and Its Application to Subduction Zone Decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters* 236 (1–2), 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.033>.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., Demonterova E.I., Mazukabzov A.M., Lepekhina E.N., Cheong W., Kim J., 2017. Pre-collisional (>0.5 Ga) Complexes of the Olkhon Terrane (Southern Siberia) as an Echo of Events in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research* 42, 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Kovach V.P., 2005. Petrogenesis of Early Proterozoic Postcollisional Granitoids in the Southern Siberian Craton. *Petrology* 13 (3), 229–252.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ernst R., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., 2016. Proterozoic Basite Complexes of the Siberian Craton and Their Geodynamic Interpretation. In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of the Scientific Meeting on the Program of Basic Research of the RAS Section of Earth Sciences (October 11–14, 2016). Vol. 14. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 46–48 (in Russian)* [Гладkochуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А. Протерозойские базитовые комплексы Сибирского кратона и их геодинамическая интерпретация // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН (11–14 октября 2016 г.). Иркутск: ИЭК СО РАН, 2016. Вып. 14. С. 46–48].

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ernst R., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Pisarevsky S.A., Wingate M., Söderlund U., 2012. Proterozoic Basic Magmatism of the Siberian Craton: Main Stages and Their Geodynamic Interpretation. *Geotectonics* 46, 273–284. <https://doi.org/10.1134/S0016852112040024>.

Harley S.L., 1998. On the Occurrence and Characterization of Ultrahigh-Temperature Crustal Metamorphism. In: P.J. Treloar, P.J. O'Brien (Eds), *What Drives Metamorphism and Metamorphic Relations?* Geological Society of London Special Publications 138 (1), 81–107. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.138.01.06>.

Harley S.L., 2008. Refining the P-T Records of UHT Crustal Metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology* 26 (2), 125–154. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2008.00765.x>.

Holland T.J.B., Powell R., 1998. An Internally Consistent Thermodynamic Data Set for Phases of Petrological Interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16 (3), 309–343. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x>.

Kawasaki T., Motoyoshi Y., 2007. Solubility of TiO_2 in Garnet and Orthopyroxene: Ti Thermometer for Ultrahigh-Temperature Granulites. In: *Antarctica: A Keystone in a Changing World. Online Proceedings for the 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences (August 26 – September 1, 2007). Santa Barbara, California, U.S.A.* <https://doi.org/10.3133/of2007-1047.srp038>.

Kelsey D.E., 2008. On Ultrahigh-Temperature Crustal Metamorphism. *Gondwana Research* 13, 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.06.001>.

Kelsey D.E., Hand M., 2015. On Ultrahigh Temperature Crustal Metamorphism: Phase Equilibria, Trace Element

Thermometry, Bulk Composition, Heat Sources, Timescales and Tectonic Settings. *Geoscience Frontiers* 6 (3), 311–356. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.09.006>.

Letnikov F.A., Khalilov V.A., Savelieva V.B., 1995. Isotope Dating of Endogenous Processes in the Olkhon Region. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 344 (1), 96–100 (in Russian) [Летников Ф.А., Халилов В.А., Савельева В.Б. Изотопное датирование эндогенных процессов в Приольхонье // Доклады АН СССР. 1995. Т. 344. № 1. С. 96–100].

Ludwig K.R., 1999. *ISOPLOT/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Version 2.01.* Berkley Geochronology Center Special Publication 1a, 47 p.

Ludwig K.R., 2000. *SQUID 1.00: A User's Manual.* Berkley Geochronology Center Special Publication 2, 17 p.

Mekhonoshin A.S., Ernst R., Söderlund U., Hamilton M.A., Kolotilina T.B., Izokh A.E., Polyakov G.V., Tolstykh N.D., 2016. Relationship between Platinum-Bearing Ultramafic-Mafic Intrusions and Large Igneous Provinces (Exemplified by the Siberian Craton). *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 822–833. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.020>.

Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazukabzov A., Sklyarov E., Todt W., 2005. Multistage Magmatic and Metamorphic Evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Palaeoproterozoic Zircon Ages Revealed by SHRIMP and TIMS. *Precambrian Research* 136 (3–4), 353–368. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.12.003>.

Schuth S., Gornyy V.I., Berndt J., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Karpuzov A.F., Mansfeldt T., 2012. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia. *International Journal Geosciences* 3, 289–296. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.32030>.

Travin A.V., 2016. Thermochronology of Early Paleozoic Collisional and Subduction-Collisional Structures of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 434–450. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.006>.

Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., 2009. Thermochronology of the Chernorud Granulite Zone, Ol'khon Region, Western Baikal Area. *Geochemistry International* 47, 1107–1124. <https://doi.org/10.1134/S0016702909110068>.

Turkina O.M., Sukhorukov V.P., 2015. Stages and Conditions of Metamorphism of Mafic Granulites in the Early Precambrian Complex of the Angara-Kan Terrane (Southwestern Siberian Craton). *Russian Geology and Geophysics* 56 (11), 1544–1567. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.10.004>.

Vladimirov A.G., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Travin A.V., Vladimirov V.G., Khromykh S.V., Yudin D.S., Kolotilina T.B., 2011. The Geodynamic Model of Formation of Early Caledonides in the Olkhon Region (West Pribaikalie). *Doklady Earth Sciences* 436, 203–209. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10901234>.

Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Mikheev E.I., Khlestov V.V., Vladimirov A.G., Travin A.V., 2015. UHT Metamorphism of Granulites of Cape Kaltzgei, Western Baikal Region. In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of the*

Scientific Meeting on the Program of Basic Research of the RAS Section of Earth Sciences (October 14–18, 2015). Vol. 13. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 37–39 (in Russian) [Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Михеев Е.И., Хлестов В.В., Владимиров А.Г., Травин А.В. УНТ метаморфизм гранулитов мыса Калтыгей, Западное Прибайкалье // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН (14–18 октября 2015 г.). Иркутск: ИЭК СО РАН, 2015. Вып. 13. С. 37–39].

Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Vladimirov A.G., Khlestov V.V., Mikheev E.I., Travin A.V., 2016. Orthopyroxene-Silimanite-Quartz Associations of Granulites from Cape Kaltygei, Western Baikal Region. In: Correlation of Altaides and Uralides: Magmatism, Metamorphism, Stratigraphy, Geochronology, Geodynamics and Metallogeny. Proceedings of the Third International Scientific Conference (March 29 – April 1, 2016). Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 56–57 (in Russian) [Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Владимиров А.Г., Хлестов В.В., Михеев Е.И., Травин А.В. Ортопироксен-силлиманит-кварцевые ассоциации гранулитов мыса Калтыгей, Западное Прибайкалье // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы Третьей международной научной конференции (29 марта – 1 апреля 2016г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 56–57].

Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Vladimirov A.G., Khlestov V.V., Travin A.V., Mikheev E.I., Rudnev S.N., 2017. UHT Metamorphism of Granulites from the Kaltygei Cape, Western Baikal Region: Pseudosection and U-Pb (SHRIMP) Age. In: Petrology of Igneous and Metamorphic Complexes.

Proceedings of the IX All-Russia Petrographic Conference (November 28 – December 26, 2017). Vol. 9. Publishing House of CSTI, Tomsk, p. 85–91 (in Russian) [Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Владимиров А.Г., Хлестов В.В., Травин А.В., Михеев Е.И., Руднев С.Н. УНТ метаморфизм гранулитов мыса Калтыгей, Западное Прибайкалье: псевдосекции и U-Pb (SHRIMP) возраст // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы IX Всероссийской петрографической конференции (28 ноября – 2 декабря 2017 г.). Томск: ЦНТИ, 2017. Вып. 9. С. 85–91].

Volkova N.I., Travin A.V., Yudin D.S., Khromykh S.V., Mekhonoshin A.S., Vladimirov A.G., 2008. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Metamorphic Rocks of the Ol'khon Region (Western Baikal Region). Doklady Earth Sciences 420, 686–689. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08040363>.

Volkova N.I., Vladimirov A.G., Travin A.V., Mekhonoshin A.S., Khromykh S.V., Yudin D.S., Rudnev S.N., 2010. U-Pb Isotopic Dating of Zircons (SHRIMP-II) from Granulites of the Ol'khon Region of Western Baikal Area. Doklady Earth Sciences 432, 821–824. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10060243>.

Wells P.R.A., 1979. Chemical and Thermal Evolution of Archaean Sialic Crust, Southern West Greenland. Journal of Petrology 20 (20), 187–226. <https://doi.org/10.1093/petrology/20.2.187>.

Whitney D.L., Evans B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. American Mineralogist 95 (1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.

Williams I.S., 1997. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridley (Eds), Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology 7, 1–35. <https://doi.org/10.5382/Rev.07.01>.

Таблица 1. Химический состав гранулитов мыса Калтыгей [Volkova et al., 2017]

Table 1. Major element compositions (wt. %) of UHT granulites from Cape Kaltygei [Volkova et al., 2017]

№ пробы	Группа А-1 (SiO ₂ >68 мас. %, Al ₂ O ₃ <15 мас. %, Mg#<0.30)										Группа А-2 (SiO ₂ >70 мас. %, Al ₂ O ₃ <12 мас. %, Mg#>0.45)				
	14-43	14-52	15-1	15-3	15-4	14-56	Em15-01	Em15-02	Em15-10	XI-2	14-47	14-48	14-49	14-50	15-5M
SiO ₂ , мас. %	70.40	72.98	71.88	72.73	71.09	70.06	69.26	68.29	68.01	74.18	76.27	79.91	77.40	77.07	76.02
TiO ₂	0.55	1.17	0.60	0.30	0.52	1.12	0.86	1.31	1.20	0.30	0.28	0.15	0.22	0.24	0.33
Al ₂ O ₃	14.41	9.63	12.43	11.75	12.52	11.91	13.40	10.88	12.35	12.00	10.89	10.63	11.28	11.10	11.20
Fe ₂ O ₃ *	3.92	9.00	3.50	7.95	4.28	8.05	8.09	11.42	10.37	4.58	4.49	2.88	2.17	3.31	4.03
MnO	0.04	0.08	0.03	0.08	0.04	0.13	0.08	0.13	0.09	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
MgO	1.00	1.92	0.73	2.69	0.72	2.11	1.75	2.67	2.62	0.46	5.47	3.47	2.23	2.83	3.41
CaO	2.67	2.01	1.29	0.38	1.48	2.68	2.47	2.11	1.93	1.10	0.15	0.11	0.79	0.19	0.49
Na ₂ O	3.61	1.31	2.27	0.86	2.41	1.79	1.56	1.28	1.46	1.60	0.20	0.20	1.46	0.74	1.28
K ₂ O	2.88	1.45	5.11	3.12	4.91	1.48	1.32	0.93	1.62	5.30	1.37	1.67	3.72	3.63	2.12
P ₂ O ₅	0.10	0.04	0.12	0.04	0.10	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.04	0.01	0.02	0.01	0.04
Ba	0.08	0.03	0.25	0.13	0.17	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.08	0.08	0.06
Sr	0.03	0.01	–	–	–	0.01	–	–	–	–	0.00	0.01	0.02	0.01	–
Zr	0.02	0.02	–	–	–	0.03	–	–	–	–	0.04	0.02	0.04	0.04	–
п.п.п	0.31	0.55	1.23	0.36	0.88	0.56	1.07	0.78	0.51	0.49	1.00	1.00	0.58	0.77	1.17
Сумма	100.03	100.21	99.47	100.42	99.16	100.02	100.07	100.01	100.36	100.23	100.07	100.02	100.04	100.05	100.27
Mg#	0.22	0.19	0.19	0.27	0.16	0.23	0.19	0.21	0.22	0.10	0.57	0.57	0.53	0.49	0.49

№ пробы	Группа Б (SiO ₂ <60 мас. %, Al ₂ O ₃ >16 мас. %, Mg#<0.30)									
	14-53	14-54	14-55	14-55A	Em15-03	Em15-04	Em15-05	Em15-06	Em15-11	XI-1
SiO ₂ , мас. %	55.35	52.37	54.91	53.52	49.67	53.56	51.86	56.86	59.06	53.04
TiO ₂	1.27	1.50	1.21	1.30	1.34	1.29	1.22	1.04	1.18	1.15
Al ₂ O ₃	18.86	19.57	18.96	19.28	20.59	19.13	19.94	17.95	16.56	20.54
Fe ₂ O ₃ *	14.43	16.95	14.35	15.26	16.55	15.94	15.67	12.06	13.34	15.15
MnO	0.13	0.19	0.13	0.16	0.17	0.19	0.15	0.16	0.12	0.10
MgO	3.22	4.04	3.38	3.79	3.90	3.44	3.52	3.18	3.08	3.70
CaO	2.05	1.66	1.79	1.91	2.02	1.97	1.38	2.26	2.51	1.40
Na ₂ O	1.55	1.22	2.65	2.33	1.31	1.39	1.25	1.64	1.79	1.11
K ₂ O	2.41	1.81	2.49	2.36	2.09	1.79	2.64	2.75	1.60	2.88
P ₂ O ₅	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.10	0.07	0.07
Ba	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.05	0.07
Sr	0.01	0.01	0.01	0.01	–	–	–	–	–	–
Zr	0.02	0.02	0.02	0.02	–	–	–	–	–	–
п.п.п	0.71	0.94	0.22	0.07	1.18	1.11	1.17	1.51	0.76	1.03
Сумма	100.15	100.4	100.26	100.13	99.06	100.03	99.05	99.80	100.22	100.35
Mg#	0.20	0.21	0.21	0.22	0.21	0.19	0.20	0.23	0.20	0.21

Примечание. Fe₂O₃*=FeO+Fe₂O₃, Mg#=Mg/(Mg+Fe) (мол. кол.), прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения.

Note. Fe₂O₃*=FeO+Fe₂O₃, Mg#=Mg/(Mg+Fe) (mol.), dash – content below the detection limit.

Таблица 2. Минеральные ассоциации гранулитов мыса Калтыгей
Table 2. Mineral associations of granulites from Cape Kaltygei

№ образца	Grt	Crd	Hyp	Sil	Bt	Kfs	Pl	Qz	Spl	Amp
Grt–Opx–Crd–Sil гнейсы										
14-47	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
14-48	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
14-50	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
14-50l	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
14-49	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–
Crd–Bt–Sil гнейсы										
14-43	–	+	–	+	+	+	+	+	–	+
14-51	–	+	–	+	+	–	+	+	–	–
14-52	–	+	–	+	+	–	+	+	–	–
Opx–Crd–Bt–Sil гнейс										
14-56	–	+	+	+	+	–	+	+	–	–
Grt–Crd–Bt–Sil гнейсы										
14-55	+	+	–	+	+	+	+	+	in-Grt	–
14-55a	+	+	–	+	+	+	+	+	in-Grt	–
14-54	?	+	–	+	+	+	–	+	–	–
14-53	–	+	+	+	+	+	+	+	–	–

Примечание. Сокращения названий минералов здесь и далее в статье по [Whitney, Evans, 2010].
Note. Abbreviated names of minerals after [Whitney, Evans, 2010].

Таблица 3. Представительные анализы гранатов из гранулитов мыса Калтыгей

Table 3. Electron microprobe analyses of garnets from granulites of Cape Kaltygei

Порода	Grt+Opx+Crd+Fsp+Sil+Qz+Bt±Pl												Grt+Crd+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qz(±Spl)					
№ обр.	14-47 (κ)	14-47 (κ)	14-47 (ц)	14-48 (ц)	14-48 (κ)	14-50 (ц)	14-50 (κ)	14-50 (κ)	14-50l (ц)	14-50l (κ)	14-50l (ц)	14-50l (κ)	14-55 (ц)	14-55 (κ)	14-55a (κ)	14-55a (κ)	14-55a (ц)	14-55a (κ)
SiO ₂	38.69	38.94	38.97	39.33	39.21	39.32	38.99	39.44	39.17	39.15	39.36	38.99	38.47	38.72	37.87	38.03	38.07	37.99
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.07	0.06	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	21.96	21.81	22.11	22.24	22.16	22.43	22.48	22.47	22.28	22.18	22.06	22.25	21.85	21.57	21.77	21.61	21.49	21.52
FeO*	30.11	30.26	29.59	28.09	28.47	28.10	28.40	28.57	27.18	27.78	27.96	28.38	30.27	30.52	31.28	32.16	30.91	30.83
MnO	0.24	0.21	0.22	0.47	0.47	0.12	0.16	0.14	0.26	0.20	0.27	0.23	1.01	1.01	0.66	0.62	0.83	0.86
MgO	8.42	9.21	9.30	9.47	9.31	9.99	9.58	9.35	10.56	9.84	10.16	9.72	7.90	7.71	8.00	6.79	7.64	7.55
CaO	0.47	0.31	0.38	0.74	0.71	0.86	0.56	0.65	0.72	0.57	0.73	0.63	0.82	0.78	0.86	0.77	0.84	0.80
Na ₂ O	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03	0.01	0.04	0.00	0.01	0.02	0.05	0.06	0.06	0.02
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Сумма	99.92	100.75	100.59	100.34	100.36	100.83	100.19	100.68	100.24	99.80	100.63	100.21	100.34	100.33	100.56	100.11	99.90	99.59
Si	3.003	2.997	2.994	3.011	3.008	2.993	2.991	3.010	2.990	3.007	3.002	2.992	2.991	3.012	2.953	2.988	2.985	2.987
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.002	0.001
Al	2.008	1.978	2.002	2.007	2.003	2.012	2.032	2.021	2.004	2.008	1.983	2.012	2.002	1.977	2.000	2.001	1.986	1.994
Fe ²⁺	1.951	1.944	1.898	1.796	1.824	1.786	1.819	1.820	1.732	1.781	1.781	1.818	1.965	1.982	2.036	2.110	2.023	2.024
Mn	0.016	0.014	0.015	0.030	0.030	0.008	0.011	0.009	0.017	0.013	0.017	0.015	0.066	0.067	0.044	0.041	0.055	0.057
Mg	0.973	1.056	1.064	1.080	1.064	1.133	1.095	1.063	1.201	1.126	1.154	1.111	0.915	0.894	0.929	0.795	0.892	0.884
Ca	0.039	0.026	0.031	0.061	0.059	0.070	0.046	0.053	0.059	0.047	0.059	0.052	0.068	0.065	0.072	0.065	0.071	0.068
Mg#	0.333	0.352	0.359	0.376	0.368	0.388	0.376	0.369	0.409	0.387	0.393	0.379	0.318	0.311	0.313	0.274	0.306	0.304
Alm	65.5	64.0	63.1	60.5	61.3	59.6	61.2	61.8	57.6	60.0	59.1	60.7	65.2	65.9	66.1	70.1	66.5	66.7
Grs	1.3	0.8	1.0	2.0	2.0	2.3	1.6	1.8	2.0	1.6	2.0	1.7	2.3	2.2	2.3	2.1	2.3	2.2
Prp	32.7	34.7	35.4	36.4	35.7	37.8	36.9	36.1	39.9	37.9	38.3	37.1	30.4	29.7	30.2	26.4	29.3	29.2
Sps	0.5	0.4	0.5	1.0	1.0	0.3	0.4	0.3	0.6	0.4	0.6	0.5	2.2	2.2	1.4	1.4	1.8	1.9

Примечание. * – ΣFeO+Fe₂O₃, (κ) – край, (ц) – центр.

Note. * – ΣFeO+Fe₂O₃, (κ) – rim, (ц) – centre.

Таблица 4. Представительные анализы ортопироксенов из гранулитов мыса Калтыгей

Table 4. Electron microprobe analyses of orthopyroxenes from granulites of Cape Kaltygei

Порода	Grt+Opx+Crd+Bt+Fsp+Sil+Qz								Opx+Crd+Bt+Fsp+Sil+Qz		Opx+Crd+Bt+Pl+Sil+Qz			
№ обр.	14-47 (ц)	14-47 (к)	14-48 (ц)	14-48 (к)	14-50 (ц)	14-50 (к)	14-50l (ц)	14-50l (к)	14-53 (ц)	14-53 (к)	14-56 (п)	14-56 (ц)	14-56 (ц)	14-56 (к)
SiO ₂ , мас. %	49.23	50.89	49.99	50.33	50.13	49.93	49.88	50.70	53.08	53.84	49.66	49.25	49.17	50.62
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.10	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	6.64	4.40	6.45	5.45	6.45	5.91	6.76	5.00	2.83	1.63	6.28	7.17	7.55	4.92
FeO*	23.41	23.46	25.05	24.21	22.68	22.41	21.84	22.83	20.96	19.88	20.83	20.30	20.54	21.41
MnO	0.06	0.05	0.12	0.10	0.00	0.02	0.06	0.08	1.97	2.14	1.86	1.73	1.76	2.02
MgO	20.75	21.16	18.46	19.62	20.87	21.15	21.46	21.28	21.05	22.29	21.50	21.44	21.04	20.78
CaO	0.03	0.02	0.02	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.04
Na ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	100.12	99.98	100.11	99.78	100.16	99.49	100.15	100.03	99.99	99.90	100.21	99.95	100.15	99.81
Si	1.838	1.900	1.876	1.889	1.860	1.865	1.845	1.887	1.969	1.991	1.845	1.829	1.824	1.892
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.292	0.194	0.285	0.241	0.282	0.260	0.295	0.219	0.124	0.071	0.275	0.314	0.330	0.217
Fe ²⁺	0.729	0.731	0.785	0.758	0.702	0.699	0.675	0.709	0.649	0.614	0.646	0.629	0.636	0.668
Mn	0.002	0.002	0.004	0.003	0.000	0.001	0.002	0.003	0.062	0.067	0.059	0.054	0.055	0.064
Mg	1.153	1.176	1.032	1.097	1.153	1.177	1.182	1.180	1.163	1.228	1.190	1.186	1.163	1.157
Ca	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001
Na	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg#	0.613	0.617	0.568	0.591	0.621	0.627	0.637	0.624	0.642	0.667	0.648	0.653	0.646	0.634

Примечание. * – ΣFeO+Fe₂O₃, (к) – край, (ц) – центр, (п) – промежуточная зона.

Note. * – ΣFeO+Fe₂O₃, (к) – rim, (ц) – centre, (п) – intermediate part.

Таблица 5. Представительные анализы кордиеритов из гранулитов мыса Калтыгей

Table 5. Electron microprobe analyses of cordierites from granulites of Cape Kaltygei

Порода	Grt+Opx+Crd+Bt+Kfs+Sil+Qz±Pl								Opx+Crd+Bt+Pl+Sil+Qz		Grt+Crd+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qtz (±Spl)				Opx+Crd+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qz	
№ обр.	14-47	14-47	14-48	14-48	14-50	14-50	14-50l	14-50l	14-56	14-56	14-55	14-55	14-55a	14-55a	14-53	14-53
SiO ₂	49.63	49.47	50.45	49.80	49.99	49.50	51.03	50.02	50.04	50.21	49.94	49.49	50.03	49.47	50.30	50.47
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	33.78	33.74	33.46	33.21	34.11	33.54	34.01	33.76	33.64	33.39	33.61	33.39	33.75	33.64	33.53	33.00
FeO*	3.41	4.11	4.55	5.04	3.30	4.59	2.98	4.60	3.35	3.90	4.77	5.00	4.59	4.82	3.07	3.39
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.30	0.34	0.03	0.02	0.04	0.04	0.29	0.30
MgO	11.61	11.23	10.76	10.58	11.77	10.81	11.71	11.04	11.49	11.08	11.02	10.74	10.93	11.01	11.58	11.62
CaO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.01	0.02	0.05	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.05
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Сумма	98.43	98.57	99.22	98.68	99.22	98.50	99.77	99.56	98.87	98.94	99.38	98.67	99.41	99.06	98.80	98.83
Si	4.988	4.982	5.048	5.027	4.982	4.998	5.043	4.998	5.011	5.035	5.002	4.999	5.004	4.976	5.032	5.055
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000
Al	4.000	4.004	3.945	3.950	4.006	3.990	3.961	3.975	3.970	3.945	3.967	3.974	3.978	3.987	3.952	3.895
Fe ²⁺	0.286	0.346	0.380	0.425	0.275	0.387	0.246	0.384	0.280	0.327	0.399	0.422	0.383	0.405	0.256	0.283
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.026	0.029	0.002	0.002	0.003	0.003	0.024	0.026
Mg	1.738	1.685	1.604	1.591	1.747	1.626	1.724	1.643	1.714	1.655	1.644	1.616	1.629	1.650	1.725	1.734
Ca	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.006	0.008	0.008	0.004	0.010	0.006	0.003	0.003	0.004	0.002	0.004	0.005	0.009
K	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000
Mg#	0.859	0.830	0.808	0.789	0.864	0.808	0.875	0.811	0.860	0.835	0.805	0.793	0.809	0.803	0.871	0.859

Примечание. * – Σ FeO+Fe₂O₃.

Note. * – Σ FeO+Fe₂O₃.

Таблица 6. Представительные анализы биотитов из гранулитов мыса Калтыгей

Table 6. Electron microprobe analyses of biotites from granulites of Cape Kaltygei

Порода	Grt+Opx+Crd+Bt+Fsp+Sil+Qz								Opx+Crd+Bt+Pl+Sil+Qz		Grt+Crd+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qz (\pm Spl)				Opx+Crd+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qz	
№ обр.	14-47	14-47	14-48	14-48	14-50	14-50	14-50l	14-50l	14-56c	14-56	14-55	14-55	14-55a	14-55a	14-53	14-53
SiO ₂	39.18	38.40	40.31	39.47	39.31	39.60	39.07	38.58	38.40	37.96	37.00	36.61	36.90	36.89	37.96	38.62
TiO ₂	2.31	3.41	2.49	2.59	3.57	2.78	3.52	3.40	3.08	2.98	4.23	4.92	4.80	4.70	4.17	3.96
Al ₂ O ₃	14.94	14.50	14.38	14.61	15.77	15.92	15.56	14.89	15.36	15.32	16.44	16.04	15.44	16.02	15.57	15.75
FeO*	8.50	9.29	6.34	8.88	9.42	8.40	8.80	10.38	10.75	11.10	14.26	14.75	14.61	13.65	11.56	9.29
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.09	0.12	0.02	0.00	0.02	0.00	0.15	0.12
MgO	20.07	19.23	21.40	19.41	18.14	18.68	18.51	18.08	17.40	17.30	13.83	13.28	14.36	14.66	15.59	17.47
CaO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.08	0.00
Na ₂ O	0.28	0.29	0.12	0.10	0.06	0.05	0.08	0.20	0.17	0.21	0.08	0.09	0.04	0.04	0.14	0.09
K ₂ O	10.01	9.78	10.15	9.93	10.08	10.04	10.21	9.89	10.03	10.20	10.08	9.90	9.91	10.02	9.35	9.79
Сумма	95.29	94.89	95.20	94.98	96.37	95.48	95.76	95.45	95.28	95.19	95.94	95.58	96.08	96.00	94.57	95.08
Si	2.838	2.807	2.888	2.867	2.822	2.851	2.819	2.816	2.814	2.796	2.742	2.731	2.738	2.726	2.804	2.809
Ti	0.126	0.187	0.134	0.141	0.193	0.150	0.191	0.187	0.170	0.165	0.236	0.276	0.268	0.261	0.232	0.217
Al	1.275	1.249	1.214	1.251	1.334	1.350	1.323	1.281	1.326	1.330	1.436	1.410	1.350	1.395	1.355	1.350
Fe ²⁺	0.514	0.567	0.379	0.539	0.565	0.505	0.530	0.632	0.658	0.683	0.882	0.919	0.905	0.842	0.713	0.564
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.006	0.007	0.001	0.000	0.001	0.000	0.010	0.007
Mg	2.165	2.094	2.284	2.100	1.940	2.003	1.989	1.966	1.899	1.898	1.527	1.476	1.587	1.614	1.716	1.893
Ca	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.006	0.000
Na	0.039	0.041	0.017	0.014	0.008	0.007	0.010	0.028	0.025	0.030	0.011	0.013	0.006	0.006	0.020	0.013
K	0.924	0.912	0.927	0.920	0.923	0.922	0.939	0.920	0.937	0.958	0.952	0.942	0.937	0.944	0.881	0.908
Mg#	0.808	0.787	0.858	0.796	0.775	0.799	0.790	0.757	0.743	0.736	0.634	0.616	0.637	0.657	0.706	0.770

Примечание. * – Σ FeO+Fe₂O₃.

Note. * – Σ FeO+Fe₂O₃.

Таблица 7. Представительные анализы полевых шпатов из гранулитов мыса Калтыгей

Table 7. Electron microprobe analysis of K-feldspars and plagioclases from granulites of Cape Kaltygei

Порода	Grt+Opx+Crld+Bt+Fsp+Sil+Qz±Pl								Opx+Crld+Bt+Pl+Sil+Qz		Grt+Crld+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qz (±Spl)				Opx+Crld+Bt+Pl+Kfs+Sil+Qz	
№ обр.	14-47	14-47	14-48	14-48	14-50	14-50	14-50l	14-50l	14-56	14-56	14-55	14-55	14-55a	14-55a	14-53	14-53
Минерал	Kfs	Pl-in-Kfs	Kfs	Pl-in-Kfs	Kfs	Pl-in-Kfs	Kfs	Pl-in-Kfs	Pl	Pl	Kfs	Pl	Kfs	Pl	Kfs	Pl
SiO ₂	66.15	68.82	66.26	68.80	66.78	68.34	65.39	66.28	57.20	57.02	64.26	61.22	64.34	60.98	65.30	56.68
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.05	0.01	0.03	0.00	0.00	0.09	0.05	0.01	0.04
Al ₂ O ₃	18.20	19.72	17.95	18.69	19.03	19.46	18.36	21.38	27.10	26.90	18.34	24.40	18.53	24.73	18.38	27.05
FeO*	0.01	0.03	0.01	0.59	0.04	0.05	0.03	0.08	0.06	0.04	0.06	0.11	0.03	0.03	0.16	0.10
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.13	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
MgO	0.01	0.01	0.03	0.23	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.04	0.04
CaO	0.03	0.08	0.07	0.29	0.24	0.24	0.13	2.39	9.38	9.11	0.03	6.05	0.05	5.94	0.08	9.79
Na ₂ O	1.07	11.05	1.02	7.61	2.52	7.65	1.77	10.05	6.48	6.42	1.17	8.11	1.08	7.76	0.95	6.07
K ₂ O	15.24	0.53	14.33	3.66	11.91	4.26	14.40	0.22	0.11	0.08	15.27	0.15	15.34	0.14	14.86	0.07
Сумма	100.70	100.26	99.67	99.87	100.52	100.02	100.22	100.58	100.36	99.65	99.15	100.04	99.452	99.63	99.78	99.88
Si	3.019	2.998	3.038	3.037	3.010	3.012	2.999	2.897	2.560	2.566	2.991	2.720	2.985	2.714	3.007	2.551
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.001
Al	0.979	1.012	0.970	0.972	1.011	1.011	0.992	1.101	1.429	1.427	1.006	1.277	1.013	1.297	0.997	1.434
Fe ³⁺	0.000	0.001	0.000	0.010	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.003	0.002
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Mg	0.000	0.000	0.002	0.015	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003	0.003
Ca	0.001	0.004	0.003	0.014	0.011	0.011	0.006	0.112	0.450	0.439	0.001	0.288	0.002	0.283	0.004	0.472
Na	0.095	0.933	0.091	0.651	0.220	0.653	0.157	0.851	0.562	0.560	0.106	0.698	0.097	0.669	0.085	0.529
K	0.887	0.030	0.838	0.206	0.684	0.239	0.842	0.012	0.006	0.005	0.906	0.008	0.907	0.008	0.873	0.004
Kfs	90.2	3.1	89.9	23.7	74.7	26.5	83.8	1.2	0.6	0.5	89.5	0.8	90.1	0.8	90.8	0.4
Ab	9.6	96.5	9.7	74.7	24.0	72.3	15.6	87.3	55.2	55.7	10.4	70.2	9.7	69.7	8.8	52.7
An	0.2	0.4	0.3	1.6	1.3	1.2	0.6	11.5	44.2	43.8	0.1	29.0	0.2	29.5	0.4	46.9

Примечание. * – ΣFeO+Fe₂O₃, Pl-in-Kfs – включения плагиоклаза в калиевом полевоом шпате.

Note. * – ΣFeO+Fe₂O₃, Pl-in-Kfs – plagioclase inclusions in potassium feldspar.

Таблица 8. Представительные анализы герцинитов и магнетитов (шпинелей) из гранулитов мыса Калтыгей

Table 8. Electron microprobe analyses of hercynites and magnetites from granulites of Cape Kaltygei

№ обр.	14-55	14-55	14-55	14-55	14-55	14-55	14-55	14-55a	14-55a	14-55a	14-55a	14-55a	14-55a	14-55a
Минерал	Spl	Spl (к)	Spl	Spl	Mag	Mag	Mag	Spl	Spl (ц)	Spl (к)	Spl	Mag	Mag	Mag
SiO ₂	0.03	0.06	0.05	0.04	0.12	0.04	0.05	0.07	0.73	0.04	0.04	0.07	0.06	0.05
TiO ₂	0.00	0.01	0.02	0.18	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.00
Al ₂ O ₃	59.78	59.81	59.31	60.83	0.20	0.21	0.18	59.64	59.65	59.92	58.88	0.21	0.23	0.15
Cr ₂ O ₃	0.33	0.34	0.41	0.36	0.26	0.19	0.22	0.16	1.20	0.15	0.35	0.92	0.62	0.36
FeO*	25.71	25.24	23.16	22.57	90.72	91.80	91.48	27.47	25.28	25.90	28.40	90.38	92.09	92.95
MnO	0.04	0.07	0.04	0.06	0.03	0.03	0.00	0.03	0.06	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01
MgO	9.25	9.18	8.20	9.48	0.10	0.06	0.07	5.66	8.09	8.24	5.45	0.06	0.06	0.06
CaO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.10	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.15	0.05
K ₂ O	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01
ZnO	4.74	4.75	7.98	6.11	0.00	0.00	0.00	7.60	5.63	5.61	6.40	0.00	0.00	0.00
Сумма	99.91	99.49	99.18	99.63	91.580	92.42	92.19	100.66	100.70	99.93	99.63	91.78	93.26	93.63
Si	0.001	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	0.002	0.002	0.020	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002
Ti	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000
Al	1.929	1.937	1.946	1.961	0.009	0.009	0.008	1.961	1.928	1.946	1.957	0.010	0.010	0.007
Cr	0.007	0.007	0.009	0.008	0.008	0.006	0.007	0.003	0.026	0.003	0.008	0.028	0.019	0.011
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	1.983	1.989	1.988	0.000	0.000	0.000	0.000	1.963	1.977	1.982
Fe ²⁺	0.588	0.579	0.538	0.515	0.979	0.983	0.980	0.640	0.579	0.596	0.669	0.983	0.976	0.991
Mn	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Mg	0.377	0.376	0.340	0.386	0.006	0.003	0.004	0.235	0.331	0.338	0.229	0.003	0.003	0.003
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.007	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.011	0.003
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000
Zn	0.096	0.096	0.164	0.123	0.000	0.000	0.000	0.157	0.114	0.114	0.133	0.000	0.000	0.000
Mg#	0.391	0.394	0.387	0.428				0.269	0.363	0.362	0.255			

Примечание. * – ΣFeO+Fe₂O₃, (к) – край, (ц) – центр.

Note. * – ΣFeO+Fe₂O₃, (к) – rim, (ц) – centre.

Таблица 9. Оценки P–T условий метаморфизма гранулитов мыса Калтыгей

Table 9. P–T estimates from different geothermobarometers for metamorphism conditions of granulites from Cape Kaltygei

№ обр.	Ассоциация	Thermocalc ¹ (H ₂ O=0.4)	TWQ-2.64 ²	Grt–Opx ³ (P=8 кбар)	Ti-in-Grt, Ti-in-Opx ⁴	Grt–Crd–Sil–Qz ⁵ (T=850 °C)
Гранулиты группы А						
14-47	Grt+Crd+Opx+Sil+Kfs+Qz (+Bt, Pl)	T=765±15 °C P=7.4±0.3 кбар	T=726±2 °C P=8.2±0.1 кбар	T=860 °C		P=8.3 кбар
14-48	Grt+Crd+Opx+Sil+Kfs+Qz (+Bt, Pl)	T=801±19 °C P=7.5±0.4 кбар	T=843±14 °C P=9.1±0.2 кбар	T=945 °C		P=7.1 кбар
14-50	Grt+Crd+Opx+Sil+Kfs+Qz (+Bt, Pl)	T=850±14 °C P=8.2±0.3 кбар	T=785±10 °C P=7.8±1.3 кбар	T=885 °C	T=836 °C (Opx)	P=8.5 кбар
14-50л	Grt+Crd+Opx+Sil+Kfs+Qz (+Bt, Pl)	T=834±12 °C P=8.1±0.3 кбар	T=759±17 °C P=8.7±0.2 кбар	T=880 °C	T=870–915 °C (Grt) T=842–909 °C (Opx)	P=8.7 кбар
14-56	Opx+Crd+Bt+Sil+Pl+Qz		T=913±2 °C P=9.2±0.01 кбар		T=825 °C (Opx)	
Гранулиты группы Б						
14-53	Opx+Crd+Bt+Sil+Pl+Kfs+Qz	T=908±31 °C P=8.8±0.6 кбар	T=930±12 °C P=9.3±0.1 кбар			
14-54	Crd+Bt+Sil+Pl+Kfs+Qz					
14-55	Grt+Crd+Bt+Sil+Pl+Kfs+Qz (+Spl)	T=826±22 °C P=6.5±0.4 кбар			T=801–899 °C (Grt)	
14-55a	Grt+Crd+Bt+Sil+Kfs+Pl+Qz (+Spl)	T=817±25 °C P=6.6±0.4 кбар			T=914–950 °C (Grt)	7.8–8.0 кбар

Примечание. 1 – [Holland, Powell, 1998]; 2 – [Berman, 2007; Berman et al., 2007]; 3 – [Aranovich, Berman, 1997]; 4 – [Kawasaki, Motoyoshi, 2007]; 5 – [Wells, 1979].

Note. 1 – [Holland, Powell, 1998]; 2 – [Berman, 2007; Berman et al., 2007]; 3 – [Aranovich, Berman, 1997]; 4 – [Kawasaki, Motoyoshi, 2007]; 5 – [Wells, 1979].

Таблица 10. Результаты U-Pb анализа цирконов из гранулитов мыса Калтыгей

Table 10. U-Pb isotopic dating of zircons from granulites of Cape Kaltygei

Точка, №	²⁰⁶ Pb _c , %	U, г/г	Th, г/г	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*, г/г	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	Rho		
Обр.14-48																		
8.2	0.01	1047	129	0.13	300	1856	±4.3	1865.1	±6.4	2.9973	0.26	0.11406	0.36	5.247	0.44	0.33363	0.26	.596
3.2	0.01	738	154	0.22	212	1860.3	±7.9	1867.8	±9	2.989	0.49	0.11423	0.5	5.269	0.7	0.3345	0.49	.701
2.1	0.02	258	129	0.52	74.3	1863.6	±7.5	1855	±21	2.983	0.47	0.1134	1.1	5.243	1.2	0.3352	0.47	.379
2.2	0.01	1573	111	0.07	453	1864.9	±4.3	1871.6	±5.3	2.9808	0.27	0.11447	0.29	5.295	0.4	0.33548	0.27	.671
3.1	0.05	372	239	0.66	107	1866.2	±6.4	1894	±11	2.978	0.39	0.11588	0.63	5.364	0.74	0.3358	0.39	.530
1.2	0.00	229	41	0.18	66.2	1866.7	±7.8	1890	±14	2.978	0.48	0.11567	0.76	5.356	0.9	0.3358	0.48	.539
8.1	0.01	1044	652	0.65	302	1871	±4.3	1870.8	±6.4	2.9695	0.26	0.11442	0.35	5.313	0.44	0.33675	0.26	.594
9.1	0.03	1108	23	0.02	328	1910.3	±4.3	1944.7	±6.3	2.899	0.26	0.11923	0.35	5.67	0.44	0.34492	0.26	.597
10.2	0.04	161	95	0.61	47.8	1916.9	±9.7	1913	±16	2.887	0.58	0.1172	0.9	5.594	1.1	0.3463	0.58	.542
7.1	0.10	224	67	0.31	66.8	1921.8	±9.2	1935	±18	2.878	0.55	0.1186	1.0	5.679	1.2	0.3473	0.55	.480
10.1	0.06	235	18	0.08	70.5	1932.1	±8	1940	±14	2.861	0.48	0.11892	0.76	5.73	0.9	0.3495	0.48	.537
6.1	0.03	1083	260	0.25	325	1932.4	±4.4	1931.2	±6.2	2.8607	0.26	0.11833	0.35	5.703	0.44	0.34955	0.26	.605
4.1	0.04	360	48	0.14	111	1974.1	±7.7	1977	±11	2.791	0.45	0.1214	0.6	5.997	0.75	0.3583	0.45	.602
5.1	0.07	190	161	0.87	58.8	1981	±10	1980	±14	2.78	0.59	0.12159	0.8	6.029	1.0	0.3597	0.59	.595
1.1	0.04	425	336	0.82	136	2044.8	±6.4	2033.9	±9.2	2.6787	0.37	0.12536	0.52	6.452	0.64	0.3733	0.37	.575
Обр. 14-55																		
1.1	0.65	18	37	2.05	5.38	1871	±34	1846	79	2.970	2.1	0.1129	4.4	5.240	4.9	0.3367	2.1	.429
1.2	0.00	54	35	0.67	15.2	1844	±17	1869	37	3.019	1.0	0.1143	2.0	5.220	2.3	0.3312	1.0	.455
2.1	0.04	374	115	0.32	110	1892	±8	1871	13	2.932	0.5	0.1144	0.7	5.381	0.9	0.3410	0.5	.584
2.2	0.10	133	72	0.56	38.2	1857	±11	1877	22	2.996	0.7	0.1148	1.2	5.286	1.4	0.3338	0.7	.494
3.1	0.26	53	21	0.41	15.4	1871	±19	1866	41	2.970	1.2	0.1141	2.3	5.300	2.6	0.3367	1.2	.454
4.1	0.05	303	175	0.60	89	1898	±9	1897	14	2.921	0.6	0.1161	0.8	5.482	1.0	0.3424	0.6	.586
4.2	0.12	188	11	0.06	54.1	1859	±16	1856	27	2.992	1.0	0.1135	1.5	5.229	1.8	0.3342	1.0	.563
5.1	0.40	34	20	0.62	10.2	1939	±20	1975	51	2.850	1.2	0.1213	2.9	5.870	3.1	0.3509	1.2	.391
6.1	0.00	30	27	0.91	8.77	1872	±20	1858	44	2.969	1.2	0.1136	2.4	5.280	2.7	0.3369	1.2	.452
6.2	0.13	157	29	0.19	45.6	1875	±9	1885	22	2.962	0.6	0.1153	1.2	5.369	1.3	0.3376	0.6	.422
7.1	0.01	792	307	0.40	310	2420	±8	2403	6	2.195	0.4	0.1551	0.4	9.740	0.5	0.4555	0.4	.728
8.1	0.23	114	13	0.12	33	1865	±13	1826	29	2.980	0.8	0.1116	1.6	5.164	1.8	0.3356	0.8	.447
8.2	0.12	149	19	0.13	42.2	1838	±11	1841	22	3.031	0.7	0.1125	1.2	5.120	1.4	0.3300	0.7	.492
9.1	0.21	310	23	0.08	88.5	1848	±8	1837	18	3.011	0.5	0.1123	1.0	5.142	1.1	0.3321	0.5	.472
9.2	0.56	26	71	2.79	7.7	1880	±27	1878	68	2.954	1.6	0.1149	3.8	5.360	4.1	0.3385	1.6	.397

Примечание. Ошибки приведены для интервала 1σ. Pb_c и Pb* – доли обыкновенного и радиогенного свинца соответственно. Ошибка калибровки стандарта 0.60 %. Поправка на обыкновенный свинец приведена по измеренному ²⁰⁴Pb. Rho – коэффициент корреляции ошибок отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U и ²⁰⁶Pb/²³⁸U.

Note. Errors – for 1σ interval; Pb_c and Pb* – common and radiogenic portions, respectively. Standard calibration error – 0.60 %. Common Pb correction using measured ²⁰⁴Pb. Rho = error correlation between ²⁰⁷Pb/²³⁵U and ²⁰⁶Pb/²³⁸U.